第 38 卷第 3 期 2018 年 2 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.3 Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201611072256
贝昭贤,张秋芳,郑蔚,杨柳明,陈岳民,杨玉盛.模拟增温对中亚热带杉木人工林土壤磷有效性的影响.生态学报,2018,38(3):1106-1113.
Bei Z X, Zhang Q F, Zheng W, Yang L M, Chen Y M, Yang Y S.Effects of simulated warming on soil phosphorus availability in subtropical Chinese fir plantation.Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):1106-1113.

模拟增温对中亚热带杉木人工林土壤磷有效性的影响

贝昭贤[1,2],张秋芳[1,2],郑 蔚[1,2],杨柳明[1,2,*],陈岳民[1,2],杨玉盛[1,2]
1 福建师范大学地理科学学院,福州 350007
2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地,福州 350007

摘要:气候变暖改变与土壤磷循环相关的生物地球化学过程,对陆地生态系统磷循环产生直接或间接影响。为研究亚热带地区杉木人工林土壤磷有效性对增温的响应,开展了模拟增温实验。实验设置对照组及增温组(5℃),经过 1.5a 的短期增温,对杉木人工林的土壤全磷、有机磷、微生物量磷、有效磷、酸性磷酸酶活性及相关土壤理化性质进行测定,结果表明:增温处理下,土壤酸性磷酸酶活性提高约 1.5 倍,土壤全磷、微生物量磷以及有机磷含量分别减少了 6%、34% 和 12%,土壤有效磷含量增加 25%。可见,短期增温通过提高土壤磷酸酶活性进而促进土壤有机磷矿化和降低土壤微生物固磷量,从而增加土壤磷有效性,但是增温导致潜在可利用的土壤微生物量磷大幅度的降低,将有可能加剧亚热带杉木人工林土壤磷限制。

关键词:磷有效性;增温;杉木人工林;亚热带;森林土壤

Effects of simulated warming on soil phosphorus availability in subtropical Chinese fir plantation

BEI Zhaoxian[1,2], ZHANG Qiufang[1,2], ZHENG Wei[1,2], YANG Liuming[1,2,*], CHEN Yuemin[1,2], YANG Yusheng[1,2]
1 *School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007, *China*
2 *Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou* 350007, *China*

Abstract: Phosphorus (P), one of the most important nutrients in soil, is essential for plant growth, and plays a significant role in maintaining the balance of forest ecosystems. Furthermore, soil P availability is controlled mainly by geochemical and biological processes and can be vulnerable to global climate change. Warming, which has become one of the most important topics of current study, directly and indirectly alters soil P cycling in terrestrial ecosystems; however, to date, most studies have focused on nitrogen deficiency in temperate ecosystems, and have produced inconsistent results regarding the responses of soil P dynamics. Few relevant studies have been conducted in P-deficient tropical and subtropical forest ecosystems. In order to study the potential impacts of warming on soil P fractions related to P availability, we simulated warming in a subtropical Chinese fir plantation, and undertook sampling after one and a half years of short-term warming. The result showed that soil acid phosphatase in the warming treatment was 1.5 times higher compared to that in the control treatment, and that soil available P had increased by 25%, whereas soil total P, microbial P, and organic P had declined by 6%, 34%, and 12%, respectively. The increased soil P availability after short-term soil warming is mainly attributed to an increase in acid phosphatase activity that can promote mineralization of soil organic P, and to the reduced P immobilization of microbe. Despite the increase in soil available P after short-term warming, the significant decrease in microbial P, which is potentially available for plants, is likely to exacerbate P limitation in subtropical Chinese fir

基金项目:"973"计划(2014CB954003);国家自然科学基金青年基金项目(31300523)
收稿日期:2016-11-07; **网络出版日期**:2017-10-18

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yanglm2007@ aliyun.com

plantations. The findings of this study indicate that more attention should be paid to the responses of soil P to climate warming in the subtropical zone and highlight the need for further research.

Key Words: phosphorus availability; warming; Chinese fir plantation; subtropical zone; forest soil

磷是森林土壤重要养分元素之一,其有效性直接影响植物生长、土壤呼吸、凋落物分解以及森林生产力,在维持森林生态系统功能过程中发挥着重要的作用[1-4]。土壤磷有效性与土壤矿物组成、pH、水分、温度、植被类型、土地管理、人类活动等相关[5-11]。根据 IPCC 于 2013 年发布的报告,在高排放情景下(RCP 8.5 气候预估)本世纪末全球变暖将超过 4℃[12]。当前,由全球变暖所带来的土壤水、气、热、肥等条件的变化,将直接或间接影响土壤磷循环过程,进而改变土壤磷有效性[13],相关研究已成为当前的研究热点。

增温对土壤磷有效性的影响,主要通过改变土壤磷素循环相关的生物和化学过程。其一,增温通过影响土壤微生物活性和组成,从而影响磷生物地球化学循环过程。当前关于增温对微生物的影响,结果并不一致,其对增温响应存在正反馈、负反馈以及无影响等情况,其中以对微生物无显著影响的报道居多[14-18]。其二,增温改变土壤磷酸酶活性,调节有机磷的矿化速率,从而影响土壤磷有效性。一般认为增温提高土壤磷酸酶活性[19-20],但亦存在相反的报道[21-22],并且有些研究表明增温对磷酸酶活性影响存在季节性差异[23]。其三,增温通过影响土壤理化性质,从而影响磷有效性。例如:有大量研究表明增温促进有机氮矿化,从而提高土壤氮的有效性[24],氮有效性提高可能会引起土壤氮磷养分失衡,发生解耦作用,从而加剧土壤磷限制[25];此外,氮有效性提高亦可能导致土壤酸化,降低土壤磷的有效性[26];然而当前的增温实验主要集中在温带地区和北极地区,并且增温对土壤磷素有效性的影响因生态系统的类型不同存在差异,尚缺乏磷素受限严重的热带及亚热带地区的研究结果[27]。

亚热带地区森林土壤主要为高度风化的红壤,脱硅富铝化作用强烈,磷素大多被铁、铝等固定成为植物难以直接利用的磷酸铁、铝和闭蓄态磷,影响植物生长[28]。磷已成为亚热带地区森林生态系统生产力提高的重要限制因子[29-30]。杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)是亚热带地区重要的造林树种之一,其造林面积占世界人工林面积的 6.5%,占我国人工林面积的 19%,以及我国人工林蓄积量的 25%,在我国林业生产中具有重要的地位[31]。在全球变暖背景下,增温对亚热带地区杉木人工林土壤磷素循环的影响是否会进一步加剧本地区磷限制,关乎未来杉木人工林的经营和管理。因此,本研究以亚热带杉木人工林土壤为研究对象,开展模拟土壤增温实验,旨在揭示短期增温对杉木人工林土壤磷有效性的影响和作用机制,以期为未来气候变化条件下杉木人工林土壤磷素的管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于福建三明森林生态系统与全球变化定位观测研究站-陈大观测点(26°19′N,117°36′E),属中亚热带季风气候,平均海拔 300m,年均气温 19.1℃,年均降雨量 1749mm,年均蒸发量 1585mm,相对湿度 81%。土壤为黑云母花岗岩发育的红壤。

1.2 样地设置

本实验为杉木幼苗增温控制实验,土壤取自皆伐后的成熟杉木人工林,取回前使用环刀法测定每层土壤容重,然后分 3 层(0—10,10—20,20—70cm)取回,并按 20—70、10—20、0—10 cm 的顺序分层回填进 2m×2m 的实验小区中(采用 4 块 PVC 板焊接而成,与周边土壤隔开,防止相互干扰),采用压实法使其与原位土壤容重接近。2013 年 11 月在每块实验小区内种植 4 棵长势相近的杉木,每株杉木行距为 1m,距实验小区边缘 PVC 板为 0.5m。实验设置 2 个处理,分别为对照(CK)和增温(W),每个处理 5 个重复。本研究采用埋设加热电缆的方式进行控制增温,电缆布设方式可见陈仕东等[32],样地于 2014 年 3 月开始通电增温,幅度为 5℃。

1.3 样品采集

于 2015 年 10 月对各处理样地进行 0—10cm 土壤样品的采集，每块样地随机取 5 个点，使用内径 2cm 的土钻进行取土，混合均匀，剔除根系、小碎石等杂物，过 2mm 筛子，分成 3 份，取其中一份鲜土保存于 4℃ 冰箱中以备土壤微生物、酶活性等指标的测定。另外两份土壤样品自然风干后，再取其中一份过 0.149mm 筛子，分别用于土壤理化性质和不同形态磷的测定。

1.4 各指标测定方法

土壤碳氮：采用 Elementar Vario MAX 碳氮元素分析仪测定；土壤微生物量碳和氮采用熏蒸-硫酸钾浸提法[33]；土壤有效氮：采用氯化钾浸提法[34]；浸提液中有机碳含量使用总有机碳分析仪（TOC-VCPH/CPN，日本）测定，总氮含量使用连续流动分析仪（Skalar san++，荷兰）测定。土壤全磷：采用浓硫酸-高氯酸消煮法[35]，土壤有效磷：采用 Mehlich-3 浸提法[36]，土壤有机磷：采用灼烧法[37]，土壤微生物量磷：采用氯仿熏蒸-碳酸氢钠浸提法[33]。上述全部磷指标完成提取后均采用连续流动分析仪（Skalar san++，荷兰）进行测定。酶活性参照 Saiya-Cork 和 Sinsabaugh 的方法[38]，并用多功能酶标仪（SpectraMax M5，美国）进行测定。

1.5 统计分析

数据经 Microsoft Excel 2007 软件初步处理后，采用 SPSS 19.0 软件对土壤温度、含水率、pH、土壤碳氮等基本理化性质，土壤全磷、有机磷、无机磷、有效磷和微生物量磷等磷指标，以及酸性磷酸酶活性进行方差分析（Tukey，$\alpha=0.05$），由此分析不同处理之间各个参数的差异显著性；使用 SPSS 19.0 软件对土壤磷指标与土壤理化性质和酸性磷酸酶进行相关性分析（Pearson，$\alpha=0.05$），并以土壤磷指标作为物种因子，土壤理化性质和酸性磷酸酶作为环境因子，用 Canoco 5 软件进行冗余分析，以分析土壤不同磷组分与土壤不同环境因子之间的相关性，图表用 Origin 9.0 画图软件绘制。

2 结果与分析

2.1 增温对土壤理化性质的影响

增温实验使 0—10cm 土壤温度提高了 3.82℃，使土壤水分降低了 20%，对土壤 pH、土壤全碳、全氮以及 C/N 比无显著影响，但显著提高土壤有效氮的含量（表 1）。

表 1 各处理土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical characteristic of soils at different treatments (mean±SD, $n=5$)

处理 Treatment	酸碱度 pH	温度 Temperature/℃	含水率 Moisture/%	有效氮 Available N/(mg/kg)	土壤全碳 Total C/(g/kg)	土壤全氮 Total N/(g/kg)	土壤碳氮比 C/N
对照 Control	4.53±0.10a	21.48±0.65b	17.98±1.87a	6.13±0.37b	13.57±2.40a	1.38±0.20a	9.81±0.31a
增温 Warming	4.66±0.12a	25.30±0.10a	14.28±0.96b	8.65±1.06a	11.60±2.02a	1.23±0.17a	9.38±0.39a

同一列不同小写字母表示不同处理间在 95% 置信水平下差异显著，图中数据为平均值±标准差（$n=5$）

2.2 增温对土壤不同形态磷的影响

土壤磷形态组成直接影响土壤磷有效性，土壤中不同形态磷对增温响应不同（图 1），与对照组相比，增温处理使土壤全磷显著下降了 6%（$P<0.05$），而土壤有效磷则显著提高 25%（$P<0.05$）；增温对土壤有机磷含量影响虽未达到显著水平，但有下降趋势，降低了 12%（$P>0.05$）；增温处理显著降低土壤微生物量磷含量，降幅达 34%（$P<0.05$）；增温对土壤无机磷影响不显著。

2.3 增温对土壤酸性磷酸酶的影响

酸性磷酸酶与土壤磷循环密切相关，其活性高低影响土壤有机磷的矿化作用，是酸性土壤中最重要的磷素获得酶[39]。如图 2 所示，与对照相比，增温处理使酸性磷酸酶活性显著提高约 1.5 倍，可见温度提高对酸性磷酸酶活性的影响显著。

2.4 土壤磷形态与土壤理化性质、微生物指标的相关性分析

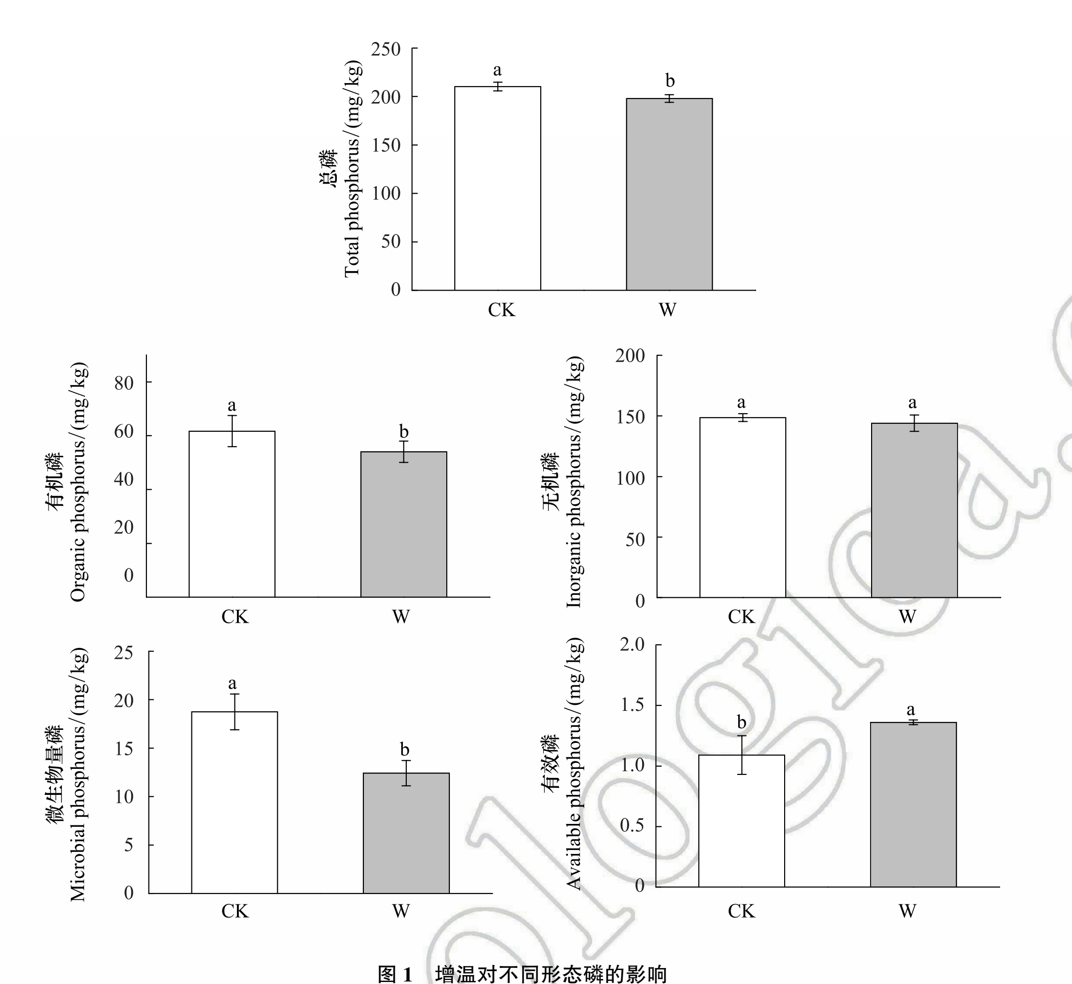


图 1　增温对不同形态磷的影响

Fig.1　Effect of warming on different forms of phosphorus

CK: 对照处理 Control; W: 增温处理 Warming; 不同小写字母表示不同处理间在 95%置信水平下差异显著,图中数据为平均值±标准差(n=5)

以土壤中不同形态的磷组分为物种数据,以土壤理化性质及微生物指标为环境因子,对不同处理进行冗余分析(RDA),结果如图 3 所示,环境因子共解释了土壤各磷组分变异程度的 92.72%,其中第一轴解释了磷组分变异的 83.16%,第二轴则解释了 9.56%,并且从图可知,土壤中有效磷、微生物量磷、全磷等指标的变化可以明显区分增温处理组与对照组。此外,土壤有效磷与酸性磷酸酶、土壤温度以及 DOC 呈显著正相关,与土壤微生物量磷呈显著负相关;土壤微生物量磷与土壤含水量、MBC、MBN 呈显著正相关,与温度和 pH 呈显著负相关关系,其他相关性分析结果详见表 2。

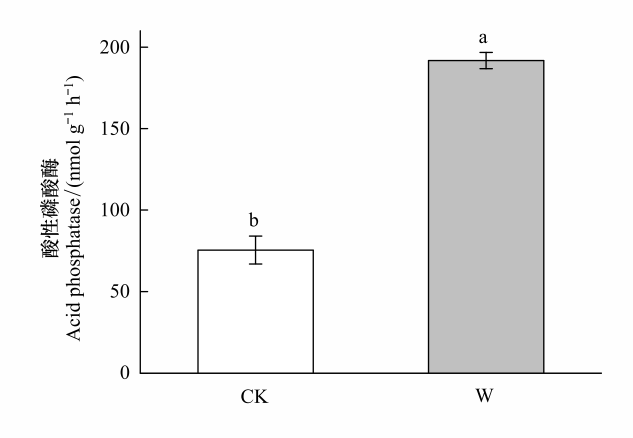


图 2　增温对土壤酸性磷酸酶的影响

Fig.2　Effect of warming on soil acid phosphatase

3　讨论

3.1　增温对土壤磷形态的影响

土壤中磷的溶解度低和移动慢等特点决定了其在陆地生态系统中淋溶损失相对较小,因此土壤磷素形态组成的变化主要取决于植物-土壤之间的内部迁移及转化过程[40]。在不考虑淋溶损失以及大气沉降的情况下,土壤全磷含量的变化取决于植物吸收量和凋落物归还量。本研究发现增温对土壤全磷和磷形态组成产生

明显的影响(图 1、图 3),其中增温使土壤全磷显著降低 6%,该结果与 Sardan 等[23]在地中海灌木林的研究结果相一致,而与 Zhang 等[25]在松嫩平原的增温研究结果不同,主要是由于植物对磷的吸收和凋落物的归还量不同导致。Zhang 等人认为增温提高地上植被的生产力,加大了植被对磷的需求量,但增温也促进了凋落物的分解,提高凋落物磷的归还量;而 Sardan 等在地中海灌木林的观察表明,增温处理导致植物叶片磷含量提高以及凋落物磷含量减少,导致了土壤总磷含量的减少。因此对于凋落物归还量较少的杉木幼苗而言,增温使土壤全磷含量降低的可能原因为增温促进植物对磷的吸收所致。

土壤有机磷矿化过程所释放的无机磷是植物生长发育所需磷素的重要来源,其受土壤酶活性、土壤微生物以及土壤理化性质的影响[41-42]。增温通过直接改变土壤磷酸酶的活性和间接改变植物和微生物对磷的需求量进而调控磷酸酶分泌量来调节土壤有机磷矿化,从而影响土壤有机磷的含量。本研究结果表明,增温处理使土壤有机磷降低了 12% ($P<0.1$),这一结果与 Rui 等[19]在青藏高原高山草甸上开展的增温实验结果相一致,其可能原因是增温提高土壤磷酸酶活性,促进有机磷的矿化,相关性分析亦表明土壤有机磷含量与土壤酸性磷酸酶活性呈显著负相关(表 2),此外土壤微生物量磷作为土壤有机磷的重要组成部分,增温导致土壤微生物固磷量的降低,亦可能是土壤有机磷含量降低的一个重要原因[43]。

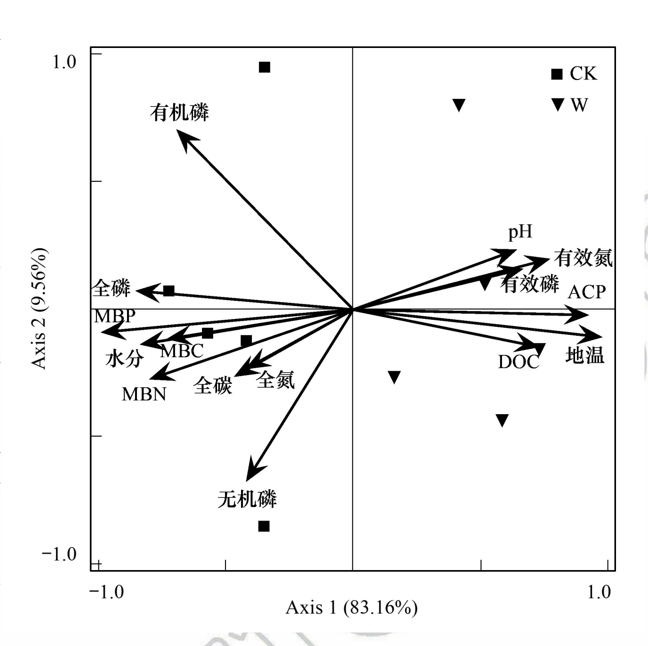


图 3 增温对土壤不同形态磷影响的冗余分析

Fig.3 Redundancy analysis (RDA) of different forms of soil P under warming treatments

MBC:微生物量碳 Microbial carbon; MBN:微生物量氮 Microbial nitrogen; MBP:微生物量磷 Microbial phosphorus; DOC:可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; ACP:酸性磷酸酶 Acid phosphatase; 图中正方形表示对照处理,倒三角形表示增温处理

表 2 土壤理化性质及微生物指标与不同形态磷组分的相关性分析

Table 2 Correlations between soil chemical and microbial properties and different forms of P in soil

土壤理化性质 Soil property	全磷 Total P	有效磷 Available P	有机磷 Organic P	无机磷 Inorganic P	微生物量磷 Microbial P
土壤温度 Soil temperature	-0.850**	0.744*	-0.762*	-0.316	-0.942**
含水率 Water content	0.864**	-0.492	0.482	0.648*	0.826**
酸碱度 pH	-0.479	0.146	-0.232	-0.399	-0.685*
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	-0.861**	0.797**	-0.676*	-0.426	-0.886**
全碳 Total C	0.550	-0.019	0.127	0.614	0.515
全氮 Total N	0.543	0.014	0.116	0.617	0.482
有效氮 Available N	-0.786**	0.703*	-0.437	-0.591	-0.766**
微生物量碳 MBC	0.580	-0.671*	0.437	0.309	0.701*
微生物量氮 MBN	0.691*	-0.531	0.347	0.561	0.817**
可溶性有机碳 DOC	-0.671*	0.744*	-0.641*	-0.205	-0.663*

*表示在 0.05 的水平上显著相关;**表示在 0.01 的水平上显著相关;-表示 pearson 相关系数为负

土壤微生物对养分的吸收和释放过程调节土壤养分有效性,其受土壤温度、水分及土壤养分含量等环境因素的影响,因此土壤增温所带来的土壤温度和水分的改变会影响土壤微生物群落及活性,从而影响其对养分的吸收和释放过程[44]。本研究中,增温显著降低土壤微生物量磷含量,其主要原因可能是由增温带来的土壤水分降低所导致,相关性分析结果表明土壤水分与土壤微生物量磷含量呈极显著的正相关关系(表 2),本

研究结果与早期 Allison 等[45]的研究结果相类似,即增温抑制土壤微生物活性,使土壤真菌和细菌含量显著降低 50%;干湿交替实验结果亦表明土壤干湿交替循环过程,亦能改变土壤微生物养分固持量,进而调节土壤养分有效性[46]。

综上,在土壤全磷未发生大幅度下降的情况下,增温处理使土壤磷有效性提高 25%,其主要来自土壤有机磷的矿化和微生物量磷的释放过程,而其中微生物所释放的磷的贡献较大,已有大量研究表明微生物在调节土壤养分过程中扮演着重要角色,虽然其与植物之间在养分获取上存在竞争关系,但是微生物具备周转速率快以及受环境因子变化所影响等特点,其死亡后所释放的养分元素亦可为植物所利用,目前土壤微生物量磷被认为是土壤潜在的重要有效磷库[47],并且微生物量磷库远大于土壤有效磷库,因此增温导致本地区微生物量磷含量的显著降低,将可能对本地区森林土壤磷养分的可持续供应带来不利的影响。

3.2 增温对酸性磷酸酶活性的影响

土壤酶活性与土壤微生物活性和土壤物理化学性质密切相关,是反映土壤环境变化的重要指标[48-49]。本研究发现增温大幅增加土壤酸性磷酸酶活性,其可能原因为:(1)土壤增温影响酶动力学,使其催化活性增加,提高土壤中的酸性磷酸酶活性[50];(2)增温促进根系周转及菌根真菌浸染率提高增加磷酸酶的分泌量,本团队前期研究发现增温增加杉木根系的数量[51];(3)磷酸酶被认为是一种富氮酶,增温促进土壤养分矿化速率,氮有效性提高,能够增加土壤磷酸酶的合成[52-53],大部分施氮实验也表明施氮提高土壤磷酸酶活性[54],而本区域土壤增温提高土壤有效氮的含量(表 1),可能也是造成土壤酸性磷酸酶活性提高的因素之一。

4 结论

短期增温通过改变土壤磷酸酶活性和土壤微生物活性,促进有机磷矿化和降低微生物固磷量,从而提高土壤磷有效性;土壤微生物量磷作为土壤磷素的供给源和储备库,是土壤磷素转化的中转站,其含量的降低将影响磷素的循环和转化过程。因此,虽然短期增温在一定程度上增加土壤磷有效性,但是增温导致潜在可利用的土壤微生物量磷大幅度的降低,将有可能加剧本地区土壤磷限制,进而对湿润亚热带森林生态系统生产力产生不利影响。

参考文献(References):

[1] Fisk M, Santangelo S, Minick K. Carbon mineralization is promoted by phosphorus and reduced by nitrogen addition in the organic horizon of northern hardwood forests. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81: 212-218.

[2] Chen H, Dong S F, Liu L, Ma C, Zhang T, Zhu X M, Mo J M. Effects of experimental nitrogen and phosphorus addition on litter decomposition in an old-growth tropical forest. PloS One, 2013, 8(12): e84101.

[3] Cleveland C C, Reed S C, Townsend A R. Nutrient regulation of organic matter decomposition in a tropical rain forest. Ecology, 2006, 87(2): 492-503.

[4] Herbert D A, Fownes J H. Phosphorus limitation of forest leaf area and net primary production on a highly weathered soil. Biogeochemistry, 1995, 29(3): 223-235.

[5] Wood T E, Matthews D, Vandecar K, Lawrence D. Short-term variability in labile soil phosphorus is positively related to soil moisture in a humid tropical forest in Puerto Rico. Biogeochemistry, 2016, 127(1): 35-43.

[6] Zhang W Q, Zwiazek J J. Responses of reclamation plants to high root zone pH: effects of phosphorus and calcium availability. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(5): 1652-1662.

[7] Jalali M, Jalali M. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture. Science of The Total Environment, 2016, 566-567: 1080-1093.

[8] Huang W J, Liu J X, Wang Y P, Zhou G Y, Han T F, Li Y. Increasing phosphorus limitation along three successional forests in southern China. Plant and Soil, 2013, 364(1/2): 181-191.

[9] Wassen M J, Venterink H O, Lapshina E D, Tanneberger F. Endangered plants persist under phosphorus limitation. Nature, 2005, 437(7058): 547-550.

[10] Chen C R, Condron L M, Sinaj S, Davis M R, Sherlock R R, Frossard E. Effects of plant species on phosphorus availability in a range of grassland

soils. Plant and Soil, 2003, 256(1): 115-130.
[11] 詹书侠, 陈伏生, 胡小飞, 甘露, 朱友林. 中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤氮磷有效性. 生态学报, 2009, 29(9): 4673-4680.
[12] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group I: Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge, UK: IPCC, 2013.
[13] McGill W B, Cole C V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. Geoderma, 1981, 26(4): 267-286.
[14] Verburg P S J, Van Dam D, Hefting M M, Tietema A. Microbial transformations of C and N in a boreal forest floor as affected by temperature. Plant and Soil, 1999, 208(2): 187-197.
[15] Domisch T, Finér L, Lehto T, Smolander A. Effect of soil temperature on nutrient allocation and mycorrhizas in Scots pine seedlings. Plant and Soil, 2002, 239(2): 173-185.
[16] Frey S D, Drijber R, Smith H, Melillo J. Microbial biomass, functional capacity, and community structure after 12 years of soil warming. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(11): 2904-2907.
[17] Frey S D, Knorr M, Parrent J L, Simpson R T. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. Forest Ecology and Management, 2004, 196(1): 159-171.
[18] Joergensen R G, Brookes P C, Jenkinson D S. Survival of the soil microbial biomass at elevated temperatures. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1129-1136.
[19] Rui Y C, Wang Y F, Chen C, Zhou X Q, Wang S P, Xu Z H, Duan J C, Kang X M, Lu S H, Luo C Y. Warming and grazing increase mineralization of organic P in an alpine meadow ecosystem of Qinghai-Tibet Plateau, China. Plant and soil, 2012, 357(1/2): 73-87.
[20] Sumann M, Amelung W, Haumaier L, Zech W. Climatic effects on soil organic phosphorus in the North American Great Plains identified by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(6): 1580-1586.
[21] Menge D N L, Field C B. Simulated global changes alter phosphorus demand in annual grassland. Global Change Biology, 2007, 13(12): 2582-2591.
[22] Rinnan R, Michelsen A, Bååth E, Jonasson S. Mineralization and carbon turnover in subarctic heath soil as affected by warming and additional litter. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(12): 3014-3023.
[23] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Warming and drought alter soil phosphatase activity and soil P availability in a Mediterranean shrubland. Plant and Soil, 2006, 289(1/2): 227-238.
[24] Butler S M, Melillo J M, Johnson J E, Mohan J, Steudler P A, Lux H, Burrows E, Smith R M, Vario C L, Scott L, Hill T D, Aponte N, Bowles F. Soil warming alters nitrogen cycling in a New England forest: implications for ecosystem function and structure. Oecologia, 2012, 168(3): 819-828.
[25] Zhang N Y, Guo R, Song P, Guo J X, Gao Y Z. Effects of warming and nitrogen deposition on the coupling mechanism between soil nitrogen and phosphorus in Songnen Meadow Steppe, northeastern China. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 65: 96-104.
[26] 孙本华, 胡正义, 吕家珑, 周丽娜, 徐成凯. 大气氮沉降对阔叶林红壤淋溶水化学模拟研究. 生态学报, 2006, 26(6): 1872-1881.
[27] Cavaleri M A, Reed S C, Smith W K, Wood T E. Urgent need for warming experiments in tropical forests. Global Change Biology, 2015, 21(6): 2111-2121.
[28] 曹娟, 闫文德, 项文化, 谌小勇, 雷丕锋, 向建林. 湖南会同不同年龄杉木人工林土壤磷素特征. 生态学报, 2014, 34(22): 6519-6527.
[29] Hou E Q, Chen C R, McGroddy M E, Wen D Z. Nutrient limitation on ecosystem productivity and processes of mature and old-growth subtropical forests in China. PloS One, 2012, 7(12): e52071.
[30] Turner B L, Yavitt J B, Harms K E, Garcia M N, Romero T E, Wright S J. Seasonal changes and treatment effects on soil inorganic nutrients following a decade of fertilizer addition in a lowland tropical forest. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(4): 1357-1369.
[31] 张秋芳, 吕春平, 贝昭贤, 谢锦升, 林伟盛, 陈岳民, 杨玉盛. 野外模拟增温对亚热带杉木叶片膜脂过氧化及保护酶活性的影响. 植物生态学报, 2016, 40(12): 1230-1237.
[32] 陈仕东, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 林成芳, 谢麟, 杨玉盛. 持续性主动增温对中亚热带森林土壤呼吸影响研究初报. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(4):1-8.
[33] Carter M R, Gregorich E G. Soil Sampling and Methods of Analysis. Florida: The Chemical Rubber Company Press, 1993: 637-644.
[34] Keeney D R A, Nelson D W. Nitrogen-inorganic forms // Page AL, Miller R H, Keeney DR, eds. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2nded.Madison, WI: American society of Agronomy, 1982: 643-698.
[35] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 166-169.
[36] Mehlich A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1984, 15

(12): 1409-1416.

[37] Walker T W, Adams A F R. Studies on Soil Organic Matter: I. Influence of Phosphorus Content of Parent Materials on Accumulations of Carbon, Nitrogen, Sulfur, and Organic Phosphorus in Grassland Soils. Soil Science, 1958, 85(6):307-318.

[38] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(9): 1309-1315.

[39] Zhou X Q, Chen C R, Wang Y F, Xu Z H, Han H Y, Li L H, Wan S Q. Warming and increased precipitation have differential effects on soil extracellular enzyme activities in a temperate grassland. Science of the Total Environment, 2013, 444: 552-558.

[40] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素. 植物生态学报, 2005, 29(1): 153-163.

[41] 陈建会, 邹晓明, 杨效东. 热带亚热带常绿阔叶林维持酸性土壤有效磷水平的磷转化过程. 生态学报, 2006, 26(7): 2294-2300.

[42] 姜一, 步凡, 张超, 陈立新. 土壤有机磷矿化研究进展. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(3): 160-166.

[43] Turner B L, Haygarth P M. Biogeochemistry: phosphorus solubilization in rewetted soils. Nature, 2001, 411(6835): 258-258.

[44] 张卫建, 许泉, 王绪奎, 卞新民. 气温上升对草地土壤微生物群落结构的影响(英文). 生态学报, 2004, 24(8): 1742-1747.

[45] Allison S D, Treseder K K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. Global Change Biology, 2008, 14(12): 2898-2909.

[46] Bünemann E K, Keller B, Hoop D, Jud K, Boivin P, Frossard E. Increased availability of phosphorus after drying and rewetting of a grassland soil: processes and plant use. Plant and soil, 2013, 370(1/2): 511-526.

[47] Dalling J W, Heineman K, Lopez O R, Wright S J, Turner B L. Nutrient availability in tropical rain forests: the paradigm of phosphorus limitation //Goldstein G, Santiago L S, eds. Tropical Tree Physiology. Switzerland: Springer International Publishing, 2016: 261-273.

[48] Wick B, Kühne R F, Vlek P L G. Soil microbiological parameters as indicators of soil quality under improved fallow management systems in south-western Nigeria. Plant and Soil, 1998, 202(1): 97-107.

[49] Chen C R, Condron L M, Davis M R, Sherlock R R. Effects of plant species on microbial biomass phosphorus and phosphatase activity in a range of grassland soils. Biology and Fertility of Soils, 2004, 40(5): 313-322.

[50] Kang H, Freeman C. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: annual variation and controlling factors. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(3): 449-454.

[51] 熊德成, 刘小飞, 陈仕东, 林伟盛, 林廷武, 林成芳, 陈光水, 杨玉盛. 土壤增温对杉木幼苗细根形态特征的影响. 亚热带资源与环境学报, 2014, 9(3): 89-91.

[52] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(5): 937-944.

[53] 陈美领, 陈浩, 毛庆功, 朱晓敏, 莫江明. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响. 生态学报, 2016, 36(16): 4965-4976.

[54] Yang K, Zhu J J, Gu J C, Yu L Z, Wang Z Q. Changes in soil phosphorus fractions after 9 years of continuous nitrogen addition in a *Larix gmelinii* plantation. Annals of Forest Science, 2015, 72(4): 435-442.